

УДК 669.295:621.78

**Ф. В. Макаров\*, Е. В. Журбина, О. З. Пожого**

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва

\*alikh916@rambler.ru

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук С. В. Скворцова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО  
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВИТ-6**

В работе исследовано сопротивление деформации при повышенной температуре интерметаллидного титанового сплава ВИТ-6 с разным содержанием водорода. Показано, что введение водорода снижает деформирующие усилия за счет формирования оптимального структурно-фазового состояния сплава.

*Ключевые слова:* орто-сплав,  $Ti_2AlNb$ , наводороживающий отжиг, фазовый состав, структура, деформация, осадка

**F. V. Makarov, E. V. Zhurbina, O. Z. Pozhoga****STUDY OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES IN VIT-6 INTERMETALLIC  
TITANIUM ALLOY CONTAINING HYDROGEN**

The work studies the deformation resistance at elevated temperature of the VIT-6 intermetallic titanium alloy with different hydrogen contents. It is shown that the introduction of hydrogen reduces the deforming forces due to the formation of the optimal structural-phase state of the alloy.

*Keywords:* orthorhombic alloy,  $Ti_2AlNb$ , hydrogen annealing, phase composition, structure, deformation, upsetting

Сплавы на основе орторомбического интерметаллида титана  $Ti_2AlNb$  являются относительно новым классом жаропрочных материалов. В настоящее время активно изучаются системы легирования таких материалов, способы получения и обработки полуфабрикатов и изделий. Особый интерес представляет изучение технологиче-

ских свойств орто-сплавов. В работе [1] показано, что дополнительное легирование водородом способствует снижению сопротивления деформации при горячей осадке орто-сплава ВТИ-4 за счет наличия гетерогенной трехфазной структуры при температуре испытания. В этой работе было исследовано деформационное поведение водородсодержащего орто-сплава ВИТ-6, в состав которого дополнительно введены  $\beta$ -стабилизаторы W и Ta, а также редкоземельный элемент иттрий (Y), способствующий повышению прочностных характеристик сплава [2].

Исследования проводили на образцах, вырезанных из плиты сплава ВИТ-6 (Ti–11,2Al–40,0Nb–1,0Mo, –1,2V–0,5W–0,4Ta–1,7Zr–0,2Si–0,25Y, здесь и далее масс. %), с исходным содержанием водорода (0,006 %) и наводороженных до 0,15 и 0,3 %. Исследования микроструктуры осуществлялись на оптическом микроскопе Axio Observer. A1m с использованием программного комплекса Nexsys ImageExpert Pro3. Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) проводили при комнатной температуре на дифрактометре ДРОН-4 в фильтрованном излучении CuK $\alpha$ . Сопротивление деформации определяли при испытаниях на сжатие в изотермических условиях при температуре 950 °C и скорости деформации  $\dot{\epsilon}_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , по результатам которых строилась зависимость удельного усилия осадки (q) от относительной степени деформации ( $\epsilon = \Delta H/H_0$ ).

По данным металлографического исследования и РСФА структура исходного полуфабриката при комнатной температуре представлена мелкодисперсной двухфазной ( $\beta$ +O) смесью, границы  $\beta$ -зерна очерчены оторочкой из относительно крупных пластин O-фазы, а внутри  $\beta$ -зерен частицы O-фазы имеют тонкопластинчатое строение и ориентированы друг относительно друга под разными углами. После наводороживающего отжига до концентраций 0,15 и 0,3 %H структура сплава также является двухфазной, однако с увеличением содержания водорода количество  $\beta$ -фазы уменьшается, а пластины O-фазы укрупняются.

При температуре деформирования 950 °C сплав с исходным содержанием водорода состоит из  $\beta$ -фазы и небольшого количества O-фазы. Сплав, содержащий 0,15 %H, состоит только из  $\beta$ -фазы, наличия O-фазы не обнаружено. При содержании 0,3 %H сплав представлен тремя фазами ( $\beta$ , O и  $\alpha_2$ ), причем количество  $\beta$ -фазы преобладает.

Испытания на сжатие при температуре 950 °C показали, что начальное усилие деформирования для образцов с исходным содержа-

нием водорода на 20 МПа больше, чем для наводороженных образцов: 0,006 %H — 172 МПа 0,15 %H — 149 МПа; 0,3 %H — 151 МПа (рис. 1).

На начальной стадии пластической деформации (2–5 %) наблюдается небольшое деформационное упрочнение, и значения усилия осадки для всех образцов возрастают в среднем на 10 МПа.

Увеличение степени деформации до 30 % приводит к постепенному снижению усилий деформирования для образцов с исходным содержанием водорода и с 0,3 %H, причем для образца, не легированного водородом, изменение более заметно, усилие осадки снижается со 180 до 160 МПа (рис. 1). Деформирование образцов с 0,15 %H не сопровождается изменением удельных усилий до степени деформации 40 %.

Увеличение удельных усилий при дальнейшем деформировании (50 % и выше) связано с усилением влияния контактного трения. При этом для образца с 0,006 %H заметное изменение наблюдается уже после деформации >30 % (рис.).

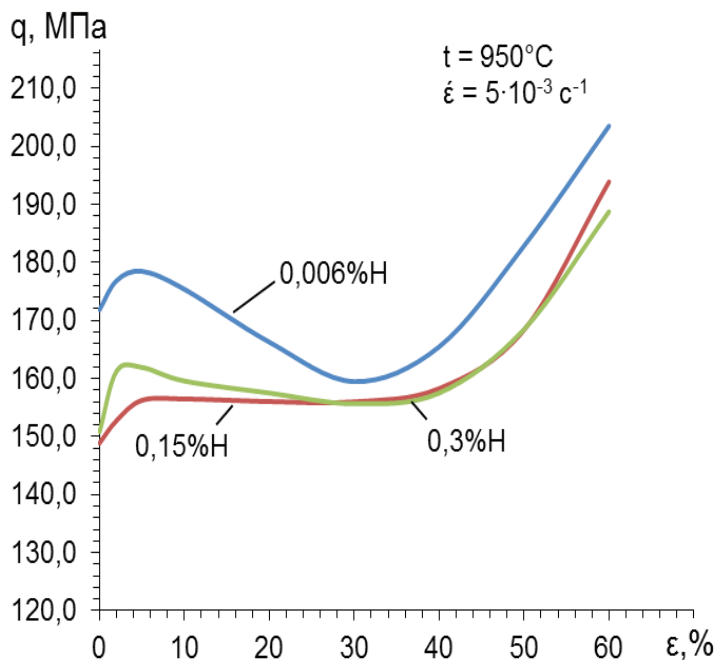


Рис. Зависимость усилий деформации от степени деформации сплава ВИТ-6 с различным содержанием водорода при температуре испытаний на сжатие 950 °С. Скорость деформации  $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$

Таким образом, полученный уровень удельных усилий осадки для сплава ВИТ-6 в исходном и наводороженном состоянии оказывается в 1,5–2 раза ниже значений, полученных для полуфабриката из сплава ВТИ-4 [1], содержащего меньше  $\beta$ -стабилизаторов. Для достижения оптимальных значений деформирующих усилий при повышенной температуре в сплав ВИТ-6 достаточно вводить не более 0,15 %Н, что обеспечивает получение пластичной однофазной  $\beta$ -структуры при температуре деформации.

*Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.*

### Литература

1. Орлов А. А., Пожого О. З., Иванов А. Е. Влияние дополнительного легирования водородом на сопротивление деформации орторомбического сплава // Уральская школа молодых металловедов: сборник материалов и докладов XIX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых (Екатеринбург, 19–23 ноября 2018 г.). Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. С. 327–331.
2. Деформируемый интерметаллидный титановый орто-сплав, легированный иттрием. Часть 1. Исследование микроструктуры слитка и построение реологических кривых / Е. Б. Алексеев [и др.] // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). С. 12–21.